



Textur i flygbilder för skattning av beståndsegenskaper

Olle Hagner

Arbetsrapport 29 1997

Förord	3
Inledning.....	4
Skogliga informationsbehov	4
Informationskomponenter	5
Flygbilder	6
Satellitbilder	7
Flygburna sensorer	7
Texturmått i digitala bilder	8
Statistiska variationsmått	8
Markov-modeller	9
Texturprimitiver	9
Identifiering av enskilda träd	9
”Fläcksegmentering”	9
Modellbaserad matchning	10
Syfte	10
Material och metoder.....	10
Studieområde	10
Mätningar på provytor	11
Indelning i tränings- och utvärderingsdataset	12
Bilddata	13
Flygbildsortofoto	13
Satellitbilsdata	13
Gråton och spektral signatur	15
Textur	16
Roberts gradient	16
Styrbara kvadraturfilter	17
Detektering av enskilda träd	17
Modellbaserad matchning av enskilda träd	18
Skattning av beståndsegenskaper	19
Neurala nätverk	19
Resultat.....	21
Gråton	21
Textur	21
Upplösning	22
Spektral signatur	23
Kombinationseffekter	24
Diskussion	24
Slutsatser	30
Referenser.....	31

Förord

Denna studie har till största delen finansierats av Skogs- och Jordbrukets forskningsråd (SJFR) inom ramen för projektet ”Texturanalys för skattning av beståndsdata i digitala flygbilder” (S-351). Studien har slutförts med hjälp av lönemedel från Rymdstyrelsen inom projektet: ”Utvärdering av geostatistiska och spektrala skattningsmetoder för skoglig inventering och planering”. Skogsvårdsstyrelsen i Västerbotten har medverkat i datainsamlingen. Ett särskilt tack riktas till Leif Söderbäck och John Nilsson för aktivt deltagande och stöd för fältinventeringen. Det digitala ortofotot har tillhandahållits av professor Juri Talts vid Lantmäteriverket i Gävle. Satellitbilsdata har tillhandahållits av SPOT-Image, och Rymdbolaget. Ett stort tack riktas till Lars Björk och Roger Johansson som genomfört den omfattande fältinventeringen samt till Åsa Lindblom som hjälpt till med sammanställningen av densamma. Dessutom uppskattas all hjälp ifrån de övriga arbetskamraterna vid avdelningen för fjärranalys, SLU Umeå.

Inledning

Skogliga informationsbehov

Tillgång till aktuell och relevant information om skogsresurserna är en förutsättning för effektiv skoglig planering. Skogen karteras och beskrivs vanligen i enheter av skogsbestånd. Med bestånd menas ett ca 0.5-10 hektar stor område med relativt enhetligt trädskikt och likartade ståndortsförhållanden. Några av de viktigaste beskrivande variablerna för beslut om avverknings- och skogsskötselåtgärder är dels relaterade till slutenhet och trädslagsfördelningen dels till trädens storlek och beståndets utvecklingsgrad. Variablerna definieras som medeltal per arealenhet av samtliga träd inom beståndet men bestäms oftast genom stickprovsmätning, eller beräknas indirekt utifrån andra variabler. Förutom medelvärden på beståndsnivå är det värdefullt med information om beståndets struktur d v s diameterfördelning, höjdvariation etc. Information av detta slag kan vara avgörande för beslut om skogsskötselåtgärder och för att beräkna utfallet vid avverkning. Det är dock vanligt att uppgifter om detta saknas eller är bristfälliga eftersom normal subjektiv skogsinventering inte lämpar sig för att beskriva dessa faktorer och objektiv mätning förutsätter en relativt omfattande datainsamling.

Det finns alltså behov av effektivare metoder för att beskriva variationen inom bestånd och om möjligt minska behovet av fältinventering. En möjlighet vore att utnyttja digitala fjärranalysbilder i kombination med anpassade mätningar i fält. Flera olika studier har visat på möjligheten att använda den spektrala signaturen i satellitbilder för skattning av beståndsegenskaper (Tomppo 1987, Hagner 1990, Ardö 1991). Det är framförallt variabler relaterade till beståndets slutenhet och trädslagsfördelning som kan skattas med spektral signatur. Digitala bilddata (både satellit- och flygbilder) anskaffas för närvarande i stor omfattning inom skogsvårdsorganisationen och storskogsbruket. Det främsta motivet är introduktionen av GIS-system som stöd för olika planeringsrutiner som i sin tur skapar ett behov av aktuella digitala bilddata som bakgrundsinformation. Inom en nära framtid kan dessutom utbudet av bilddata med upplösning i intervallet 1-4 meter förväntas öka i och med att en ny generation kommersiella fjärranalyssatelliter blir operationella.

Informationskomponenter

Informationen i fjärranalysbilder som utnyttjas för att identifiera och beskriva skogliga objekt kan hänföras till komponenterna gråton, färgnyans, form, textur och omgivning eller sammanhang.

Med gråton menas hur ljus eller mörkt som ett objekt återges i bilden och avspeglar objektets förmåga att reflektera ljus (reflektans). Gråtonen påverkas förutom av beståndsegenskaper även av betraktningssvinkel, belysnings- och atmosfärsförhållanden samt sensorns egenskaper. Av beståndsegenskaperna är det framförallt kronslutenhet, höjdstruktur, trädslagssammansättning, trädstorlek och fältskiktets sammansättning som påverkar gråtonen. (Nämnden för skoglig flygbildsteknik 1980).

Skogsbeståndets gråton kan modelleras som sammansatt av tre delkomponenter; belysta trädkronor, mark och skugga. Eftersom markvegetationen och trädkronorna ofta har likartad reflektans är det i huvudsak andelen skugga som avgör den resulterande gråtonen. I öppna bestånd är andelen skugga i stort sett proportionell med krontäckningen medan sambandet kan vara omvänt i välslutna bestånd på grund av att skuggorna på marken avskärmas allt mer. Andelen skugga beror även av betraktningssvinkeln. Avskärmningseffekten ökar vid avvikelse ifrån lodavbildning. I motljus syns en större del av skuggorna medan de avskärmas i medljus. Andelen skugga påverkas även av beståndets höjdstruktur. En stor höjdvariation minskar avskärmningseffekten genom att krontaket blir öppnare. Skuggornas täthet är en annan betydelsefull faktor. Ju större och tätare trädkronorna är desto mörkare blir skuggorna. Även förhållandet mellan direkt och diffus belysning är betydelsefullt. Skuggorna blir svagare ju större andelen som utgörs av diffus belysning.

Den reflekterade strålningens fördelning mellan olika våglängder kallas för spektral signatur. Det mänskliga färgseende kan urskilja ljus i tre våglängdsområden: blått, grönt och rött ljus. Proportionerna mellan dessa komponenter avgör vilken färgnyans som uppfattas. Med infrarödkänslig film eller elektroniska sensorer kan även ljus med längre våglängder registreras. Skillnader mellan olika vegetationstyper är ofta tydligare i de infraröda än i de synliga våglängdsbanden. Även atmosfärens påverkan (absorption och spridning) är mindre i vissa delar av det infraröda området (Karlsson 1997).

Med form menas i bildtolkningssammanhang objektets avbildade konturer samt karakteristiska ljusa och mörka partier. Ju fler bildelement som ett visst objekt avbildas med desto noggrannare kan dess form beskrivas.

Även omgivning och sammanhang kan bidra med information om ett objekt. Till exempel så kan ståndortsförhållandena för ett skogsbestånd ofta härledas utifrån den omgivande terrängen

Med textur menas den gråtonsvariation som kännetecknar objektet och kan karaktäriseras i termer av intensitet, riktning, regelbundenhet, frekvens, etc. Texturbegreppet är inte entydigt definierat. Vad som menas med textur beror av både objektetsdefinition och skala.

Exempelvis kan texturen för ett skogsbestånd i flygbilder med negativskala 1:30000 utgöras av mönstret av solbelyst och beskuggade trädkronor och mark. För en enskild trädkrona kan texturen bestå av mönstret av belysta och beskuggade delar i grenverket och bakgrunden. Eftersom textur är en beskrivning av mönstrets gråtonsvariation kvävs flera bildelement per objekt för att kunna karaktärisera den. Hur många som krävs beror av texturmåttets komplexitet. Enklare statistiska variationsmått kräver förhållandevis få bildelement medan mått som beskriver mönstrets geometriska egenskaper som till exempel orientering, frekvens, etc kräver fler.

Flygbilder

Tack vare flygbildens höga geometriska upplösning avbildas normalt varje enskilt träd i det härskande och medhärskande höjdsiktet. I gynnsamma fall kan till och med detaljer i enskilda trädkronor urskiljas. Dessutom är bildgeometrin mycket stabil och kan överföras till en kartprojektion med hög noggrannhet. Avbildnings- och belysningsgeometrin varierar dock avsevärt mellan bildens olika delar. Skillnaden i betraktningvinkel för motstående bildkanter uppgår till 73° i normala flygbilder (vidvinkelobjektiv). Ytterligare en inverkan är att kameraoptikens transmission (genomskinlighet) varierar radiellt, sk vinjettering. Effekten kan kompenseras till viss del vid fotograferingen med hjälp av tonade gråfilter som monteras på kameran. Gråton och färgnyanser beror även av exponerings och framkallningsförhållanden. Sammantaget påverkar dessa faktorer avsevärt förutsättningarna för digital analys av flygbilder. Framförallt innebär det att metoder som inte beaktar skillnaderna i avbildnings- och belysningsförhållanden endast kan användas inom begränsade

delar av bilden. Metoder som skall användas på flera bilder måste även beakta att gråton och färgnyanser inte är direkt jämförbara mellan olika bilder, inte ens inom samma fotograferingsstråk.

Satellitbilder

Satellitbilder används i mindre omfattning inom skogsbruket som ett komplement till flygbilder. Användningen motiveras framförallt av att enkelheten att täcka stora arealer med aktuella och enhetliga bilddata för regelbunden ajourhållning av kartor i GIS-miljö.

Satellitsensorer mäter den reflekterade solstrålningen elektroniskt i ett eller flera olika våglängdsområden. Vissa satelliter registrerar dessutom även mellan-infraröda och termiska våglängdsband. Även satellitbildernas geometri är välkänd och stabil. Avbildnings- och belysningsgeometrin inom scenen är praktiskt taget konstant på grund av det långa registreringsavståndet (ca 70 mil). Den nuvarande generationens fjärranalyssatelliter med en bildelementstorlek i intervallet 6-30 meter ger mycket begränsad texturinformation i skog eftersom bildelementen är avsevärt större än avståndet mellan enskilda träd vilket leder till att variationen mellan solbelyst trädkrona och skugga jämnas ut inom bildelementen. En ny generation satelliter som är avsedda att konkurrera med flygfotografering har en bildelementstorlek i storleksordningen 1-3 meter och kan därmed förväntas innehålla avsevärt mer texturinformation även om upplösningen inte är tillräcklig för att ge texturinformation för enskilda trädkronor. En annan skillnad gentemot dagens satelliter är att scenstorleken är avsevärt mindre.

Flygburna sensorer

Elektroniska sensorer kan även monteras i flygplan. De främsta fördelarna är att fler våglängdsband i en större del av spektrat kan registreras med högre radiometrisk kvalitet än med fotografisk teknik. Dessutom kan en bättre geometrisk upplösning än i satellitbilder uppnås. En tydlig utvecklingstendens kan observeras mot system med mycket hög spektral upplösning (hundratals våglängdsband). Den geometriska korrektionen förutsätter dock mycket exakt information om flygplanets position och attityd under hela registreringen. I likhet med flygfotografering varierar belysnings- och avbildningsgeometrin avsevärt inom bilden och problem med vinjettering kan förekomma. En viktig skillnad gentemot flygbilder är dock att stråkbredden är relativt begränsad vilket medför att kostnaden per arealenhet vid en

given geometrisk upplösning blir avsevärt högre. Flygburna sensorer används ännu inte i någon operationell omfattning i Sverige.

Texturmått i digitala bilder

Eftersom textur avser det lokala förhållandet mellan ljusa och mörka bildelement inom ett objekt förutsätter det dels en avgränsning av objekt dels en definition av vad som menas med "lokalt". Några av de vanligaste definitionerna på lokal omgivning är kvadratiska eller cirkulära områden där alla bildelement inom ytan ingår i "omgivningen". Man kan även definiera de omgivande bildelementens grad av tillhörighet som en funktion av avståndet t ex linjärt eller kvadratisk avtagande. Många texturmått är känsliga för övergångszonen mellan objekt. Problemet kan begränsas genom att enbart beakta den del av omgivningen som tillhör ett och samma objekt vilket kräver någon typ av förhandsindelning eller genom att löpande identifiera och utesluta bildelement i övergångszoner (Alm 1985, Hagner 1987, Franklin & Wulder 1996).

Statistiska variationsmått

De enklaste texturmåtten baseras enbart på gråtonernas statistiska variation och är oberoende mönstrets geometri (sk första ordningens texturmått). Som exempel kan nämnas varians, skillnad mellan ljusaste och mörkaste bildelement, frekvensfördelning. En fördel med denna typ av texturmått är att de ofta ingår som standard eller är relativt enkla att implementera i många bildanalyssystem. En utvidgning kan vara att beräkna variationen av variationsmått (andra ordningens texturmått). Sambandet mellan beståndsegenskaper (framförallt trädstorlek, höjdstruktur och stamantal per arealenhet) och dessa typer av variationsmått har påvisats i både teoretiska (Woodcock *et al* 1988) och empiriska studier (Franklin *et al* 1996). Gråtonsvariationens beroende av sampling avståndet och geometrisk upplösning kan även beskrivas i termer av semivarians (Matheron 1963) och lokal varians. Empiriska studier tyder på att den maximala lokala variansen i nordliga barrskogar uppnås vid 2-3 meters storlek på bildelementen (Hyppänen 1996).

En annan typ av statistiska texturmått baseras på den sk co-occurrence matrisen som beskriver sannolikhetsfördelning för att observera klassindelade gråtoner på ett visst avstånd ifrån varandra i en given riktning. Utifrån co-occurrence matrisen kan ett antal olika index beräknas som beskriver fördelningens egenskaper (Haralik 1986). Metoden är ganska känslig för hur

klassindelningen utförs. Genom att variera avstånd och riktning erhålls även information om orientering och periodicitet. Det finns även olika multispektrala varianter som arbetar med klassindelade multispektrala signaturer istället för gråtoner (Bock 1996, Barnsley & Barr 1996).

Markov-modeller

Texturens gråtonsvariationen kan modelleras som en tvådimensionell stokastisk process där bildens grånivåerna är en realisering av en stokastisk sannolikhetsfördelning. De så kallade Markov-Random-Field modellerna har visat sig vara mycket anpassningsbara till olika typer av mönster (Cross 1983). Modellerna kan även användas för att simulera olika texturmönster.

Texturprimitiver

Till skillnad ifrån de stokastiska modellerna antas texturen vara uppbyggt av grundelement eller primitiver t ex punkter, linjer, kanter, hörn. Förekomst, storlek och orientering av dessa element kan skattas med en mängd olika filter (Laws 1980, Shao and Förstner 1994, Freeman & Adelson 1991). Exempelvis kan antalet stammar per hektar i välslutna likformiga bestånd skattas genom att detektera de solbelysta delarna av trädkronorna med hjälp av Gauss-filter av varierande storlek (Pinz 1991, Dralle 1997). Filter som kvantifierar texturprimitiver kan även definieras i frekvensdomänen eller det sk fourierspektrat. Fourierspektra beskriver hur bilden gråtonsvariation är uppbyggt i termer av frekvenskomponenter. Filter som definieras i frekvensdomänen kan kvantifiera variationsintensitet, orientering, frekvens och fas m m. Möjligheten att identifiera skog i flygbilder med denna typ av filter har demonstrerats av Bårman *et al* (1990).

Identifiering av enskilda träd

”Fläcksegmentering”

I gynnsamma fall (slutna likåldriga och välgallrade bestånd) avbildas den solbelysta kronan hos varje större träd som en ljus ”fläck” med god kontrast mot omgivningen (skuggor). Givet dessa förutsättningar är det relativt enkelt att identifiera, avgränsa och mäta de enskilda trädkronor. Olika tekniker för detta har demonstrerats av Gougeon (1989,1995, 1996), Pintz (1991) och Brantberg (1994). I högupplösande bilder kan även texturen inom den enskilda trädkronan utnyttjas för att identifiera trädslag (Brantberg 1994, Pollock 1997). Dessutom kan de enskilda trädkronorna stratifieras i solbelysta och beskuggade partier vilket är värdefullt

vid analys av spektral signatur och textur (Brantberg 1994, Gong et al 1997). Problem uppstår dock ifall beståndet är tillräckligt öppet för att direktbelysning skall tränga ner till marken eftersom den solbelysta marken kan misstas för en trädkrona. Problem uppstår även vid avvikelser ifrån lodbildens geometri eftersom det påverkar den solbelysta kronans avbildade form och storlek (Dralle 1997).

Modellbaserad matchning

Ett mer robust angreppssätt än det föregående är att istället utgå ifrån dynamiskt anpassade sökmönster som genereras utifrån aktuella belysnings- och avbildningsförhållanden i olika delar av bilden samt antaganden om trädkronornas tredimensionella geometri och reflektionsegenskaper (Pollock 1997). Olika egenskaper hos de identifierade träden (kronform, kronstorlek och trädslag) härleds utifrån graden av överensstämmelse med respektive sökmönster samt den enskilda kronans textur (ifall upplösningen medger detta). Eftersom modellbaserad matchning snarast utnyttjar variationen i belysnings- och avbildningsgeometrin är den avsevärt robustare än metoder av typ fläcksegmentering. Experiment har visat att metoden fungerar väl även i mycket heterogena bestånd med avsevärd variation i slutenhet, trädslagssammansättning och trädstorlek (Pollock 1997).

Syfte

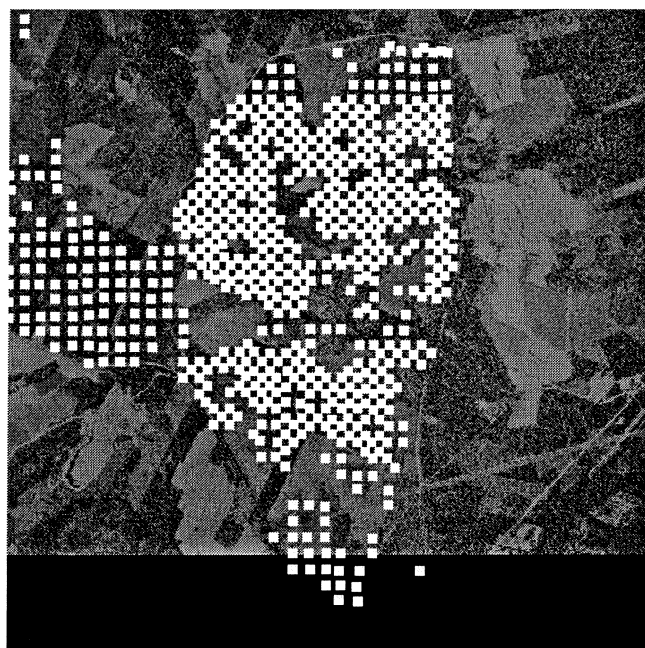
Denna studie syftar till att undersöka möjligheten att använda textur i optiska bilddata med geometrisk upplösning i intervallet 1-10 meter för att skatta olika skogliga beståndsegenskaper samt i vilken mån texturen tillför information utöver vad som kan erhållas ur gråton och multispektral signatur med 10 – 30 meters upplösning.

Material och metoder

Studieområde

Studieområdet ligger ca 15 km nordväst om Umeå (Lat. 63°,50' Long. 20°,15') och är ca 3x4 km stort. Skogstyperna är representativa för Västerbottens kustland och domineras av tall och gran med mindre inslag av löv, i huvudsak björk. En hög andel lövträd är vanligt i ungskog på frisk och fuktig mark men ovanligare i gallringsskog och saknas helt i äldre skog. Ståndortsförhållandena är ganska varierade inom området med allt ifrån magra tallhedar av lavtyp till friska moränmarker med grandominerade blandskogar av blåbärs- och lågörtstyp. Höjdvariationen inom området är måttlig med en maximal höjdskillnad på 70 meter. Inom

området finns totalt 1696 provytor fördelade i ett systematiskt gittermönster. Tätheten varierar mellan 1 – 2 ytor per hektar i olika delar av området (figur.1).



Figur 1. Provytor inom studieområdet med skog äldre än 15 år som överlappas av flygortofotot. Provyternas position har registrerats genom nålstick i stereomonterade flygbilder (1:30000) i fält och fotogrammetrisk mätning i stereoinstrument

Mätningar på provytor

Objektiva mätningar av olika beståndsegenskaper har genomförts på respektive provyta. Ägoslag och beståndets huggningsklass bedömdes enligt Skogsstyrelsens definitioner (Skogsstyrelsen 1982). Samtliga ytor ståndortsboniterades enligt Skogshögskolans boniteringssystem (Hägglund, Lundmark 1982). I huggningsklasserna gallrings- och slutavverkningsbar skog genomfördes dessutom följande mätningar: Grundytan (m^2/ha) bestämdes med hjälp av spaltrelaskop med räknefaktor 2.0 (Loetch et al 1973). Avståndet till sk. gränsträd kontrollerades med hjälp av måttband. Diameter för vartannat relaskopträd mättes genom klavning. Grundytevägd medeldiameter beräknades som medelvärde av klavträdens diametrar. Virkesförråd ($\text{m}^3\text{sk}/\text{ha}$) beräknades i två steg. Först beräknades grundytevägd formhöjd trädslagsvis med hjälp av klavträden (Söderberg 1976) Funktionerna kalibrerades för lokala avvikelser med hjälp av 250 provträd från området. Därefter beräknades virkesförrådet genom att multiplicera formhöjd och grundyta. Trädslagsfördelning beräknades som relativ andel av virkesförrådet för respektive trädslag. Beståndsålder beräknades genom tilldelning av ålder för varje klavträd utifrån riksskogstaxeringens provträdsbank baserat på: diameter och trädslag samt provytans grundyta och ståndortsindex. Antal stammar per hektar beräknades inte i gallrings- och slutavverkningsbar skog eftersom skattningarna skulle ge allt för låg precision p g a att små träd (som oftast är talrikast) blir allt

för dåligt representerade i stickprovet vid relaskopurval. Provyornas placering i fält bestämdes objektivt med hjälp av syftkompass och längdmätning med trådmätare. Provpunkternas faktiska position registrerades i fält genom nålstick i stereomonterade flygbilder i skala 1:30 000. Provpunkternas koordinater i rikets nät mättes fotogrammetriskt med hjälp av ett stereoinstrument av typ Wild B8. Efter en visuell kontroll av provvyornas position mot det digitala ortofotot bedömdes lägesnoggrannheten vara ungefär 5 meter.

Indelning i tränings- och utvärderingsdataset

Totalt 632 av ytorna som överlappas av flygortofotot representerar gallrings- och slutavverkningsbar skog. Dessa indelades genom lottning i två delar, en grupp med 369 ytor för utveckling av skattningsfunktioner (för trädslagsfördelning, virkesförråd, ålder grundyta och diameter) och en grupp med de övriga 263 ytorna för utvärdering av skattningsnoggrannhet. En sammanställning av de två dataseten visas i tabell 1 och 2.

Tabell 1. Beståndsegenskaper för provytor i tränings- och utvärderingsdataset (n=369 resp 263). Uppgifter för utvärderingsdataset visas med fet stil

Parameter	Tallandel*		Granandel*		Lövandel*		Virkesförråd		Ålder**		Grundyta		Diameter**	
	%		%		%		M3sk/ha		År		M ² /ha		Cm	
Medelvärde	56.8	65.8	34.1	25.2	8.5	10.4	126.5	122.9	68.7	63.3	18.8	18.6	19.3	18.9
Standardavvikelse	35.6	35.6	33.7	25.2	16.0	19.4	69.0	65.8	29.3	25.5	9.1	9.0	6.2	5.9
Min	0	0	0	0	0	0	5	7	15	20	2	2	0	0
Max	100	100	100	100	100	100	364	324	204	166	54	46	37.5	33.3

*Andel av virkesförråd

** Grundytevägd ålder och diameter

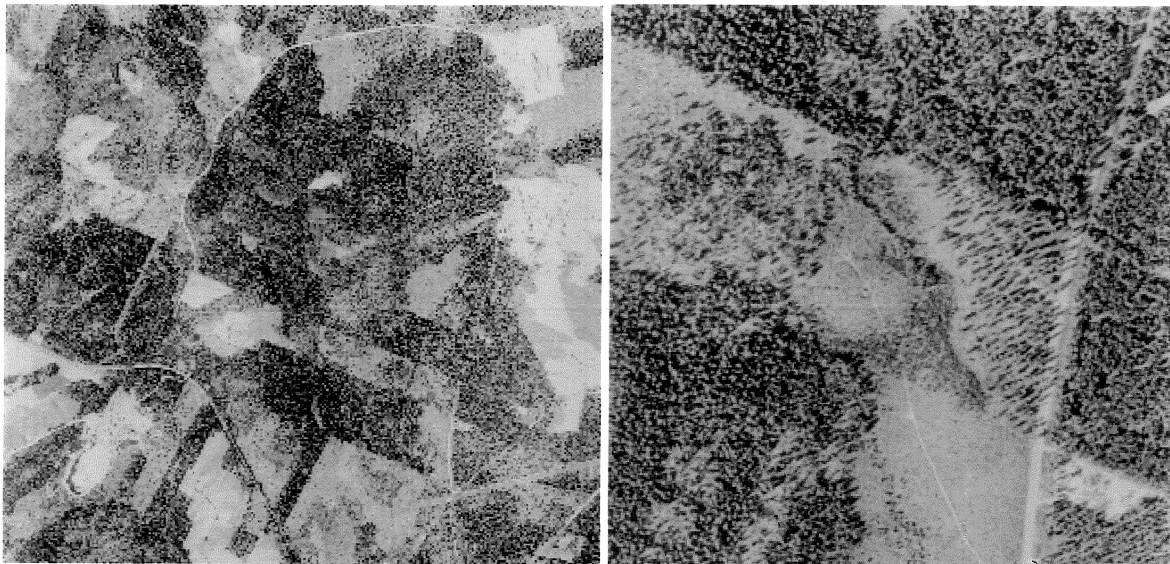
Tabell 2. Jämförelse av samvariation (korrelationskoefficient %) mellan olika beståndsegenskaper för provytorna i tränings- och utvärderingsdataset (n=369 resp 263). Uppgifter för utvärderingsdataset visas med fet stil

	Tallandel		Granandel		Lövandel		Virkesförråd		Ålder		Grundyta	
Granandel	-89	-84										
Lövandel	-33	-50	-13	-6								
Virkesförråd	-47	-56	45	52	7	18						
Ålder	-22	-5	38	28	-31	-34	21	7				
Grundyta	-42	-52	37	45	14	23	95	96	-4	-13		
Diameter	-15	-14	26	27	-23	-17	55	48	79	74	31	29

Bilddata

Flygbildsortofoto

Ett flygbildsortofoto som täcker studieområdet har tillhandahållits av Lantmäteriverket. Ortofotot har producerats med konventionell analog teknik och scannats med bildelement som motsvarar 1 meter på marken. Flygfotograferingen utfördes 1980 ifrån 9200 meters höjd (figur 2). Flygfotots nadirpunkt är belägen centralt i studieområdet. Beträktningsvinkelns avvikelser ifrån lod uppgår maximalt till 18.9° och 7.17° i medeltal för ytorna. Två tredjedelar av ytorna har mindre avvikelse än 9.0° . Dynamiken (gråtonsomfånget) var större i flygortofotot än i samtliga typer av satellitdata.



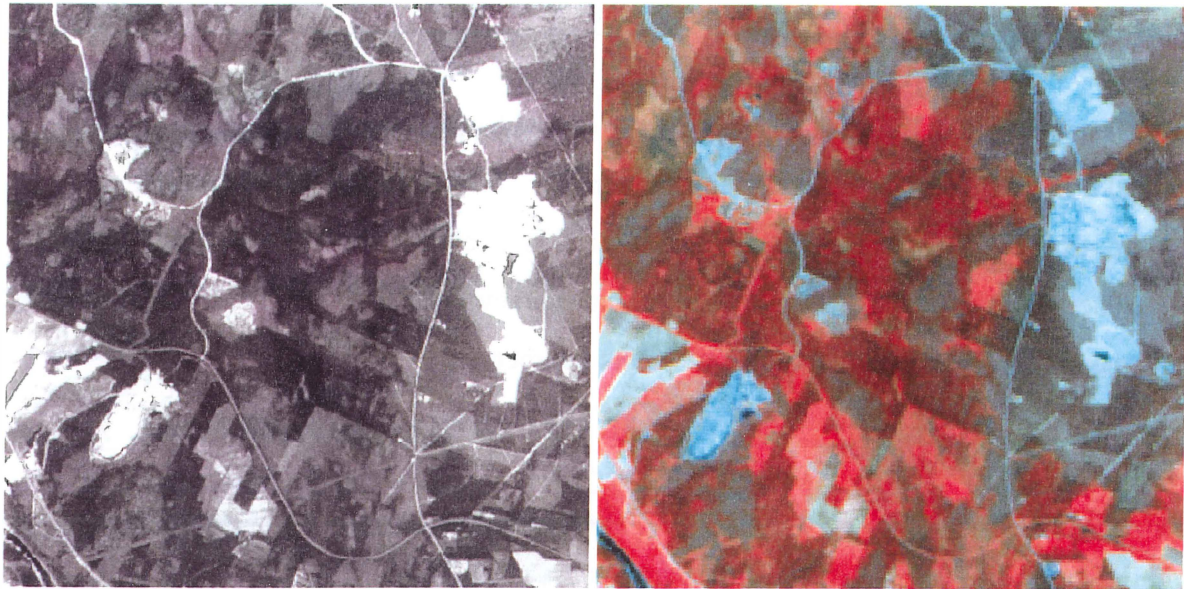
Figur 2. Flygortofoto (9200 flyghöjd) över studieområdet (vänster). Ortofotot har producerats med konventionell analog teknik och har därefter scannats med 1 meters bildelementstorlek vid Lantmäteriverket i Gävle. Inom delförstoringen till höger (400x 400 meter) visas exempel på olika skogstyper inom området. Den östra delen utgörs av talldominerad hedmark med varierande beståndstäthet. I nordvästra hörnet finns ett område med välsluten äldre granskog. Det sydvästra hörnet utgörs av medelålders barrblandskog med hällmarker. I de centrala delarna syns olika kalmarksområden med och utan fröträd samt ett område med ca 2 meter hög ungskog.

Satellitbildsdata

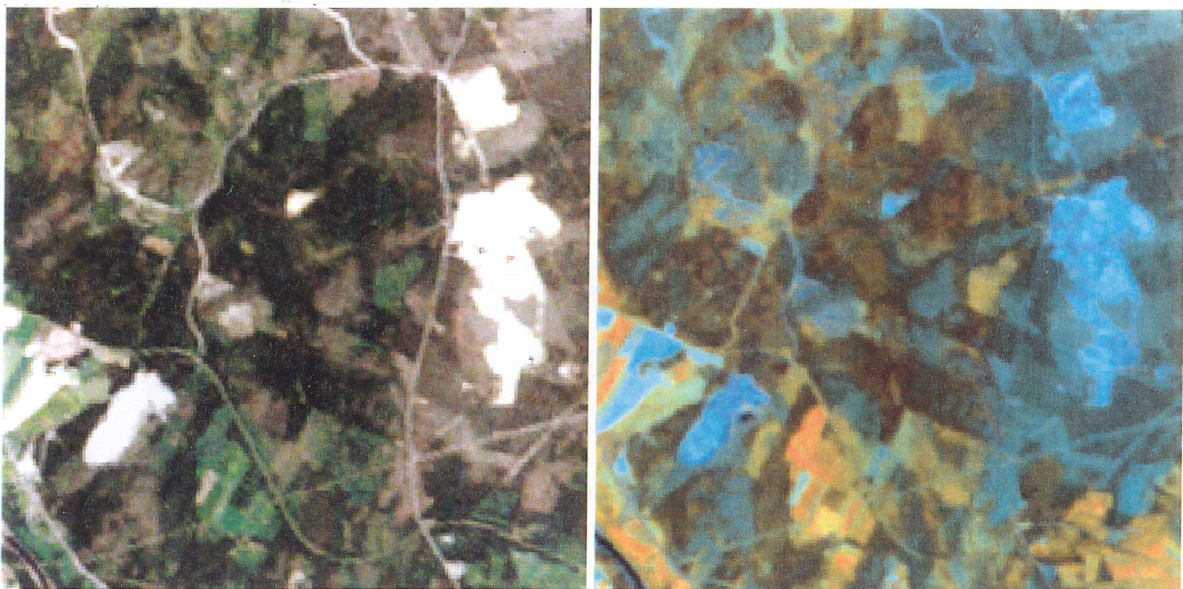
Tre olika typer av satellitbilder har använts i studien: SPOT P pankromatiskt band (grönt-rött) med 10 m bildelement registrerad 1986-06-18, SPOT XS med 3 spektralband (grönt, rött, när-IR) band och 20 meters bildelement (registrerades samtidigt som SPOT P scenen) samt Landsat TM med 7 spektralband och 30 meters bildelement registrerad 88-06-27 (tabell 3, figur 3 och 4).

Tabell 3. Sammanställning av bilddata som använts i studien

Bildtyp / Sensor	Bild / scen-ID	Band / filmtyp, negativskala	Registreringstidpunkt	Bildelementstorlek
Flygortofoto 1:10000	20K8c	Pankromatisk film, 1:60000, Flyghöjd 9200 m	Juni 1980	1 meter
SPOT-HRV P	57/218	Pankromatisk	1986-06-18	10 meter
SPOT-HRV XS	57/218	Band 1-3 Grönt – när-IR	1986-06-18	20 meter
Landsat-TM	192/15	Band 1-5,7 Blått – mellan-IR	1988-06-27	30 meter



Figur 3. SPOT P Pankromatiskt band med 10 meter bildelement (vänster) och SPOT XS multispektral bild som motsvarar infraröd färgfilm (grönt, rött, när-IR) med 20 meters bildelement (höger)



Figur 4. Landsat-TM band 1,2,3 (synliga våglängder) till vänster och band 4,5,7 (när-IR mellan-IR, mellan-IR) till höger

Satellitscenernas kvalitet var relativt normal. Både SPOT P och XS data var något randiga p g a ojämn detektorkalibrering. Det är dock frågan om relativt små variationer med en amplitud på ca en digitalnivå. Den geometriska noggrannheten i SPOT-scenerna var bättre än i Landsat TM-scenen där mindre förskjutningar tvärs banriktningen kunde upptäckas. Dynamiken i SPOT-data var högre än i motsvarande Landsat TM-band p g a den längre integreringstiden för varje bildelement. Kontrasten i Landsat TM's två mellaninfraröda band (som saknas i SPOT XS) var dock mycket god. SPOT P hade större dynamik än motsvarande SPOT XS och Landsat TM band. De systemkorrigerade SPOT-scenerna rektifierades till kartprojektion i Rikets nät. Transformationsparametrarna (andragradspolynom) beräknades utifrån kontrollpunkter som identifierats i både satellitscenen och kartan. Omsamplingen utfördes med kubisk interpolering. Landsat TM scenen levererades geometriskt precisionskorrigerad och krävde ingen ytterligare bearbetning.

Gråton och spektral signatur

Den gråton i ortofotot som ungefär motsvarar relaskopytornas omfattning beräknades genom utjämning med ett filter där vikterna motsvarar Gauss normalfördelning (Gauss-filter). Standardavvikelse och fönsterstorlek valdes till 7.0 respektive 21 x 21 meter. Skuggornas densitet beräknades som den mörkaste bildpunkten inom en 5 x 5 m omgivning med efterföljande utjämning enligt ovan (figur 5). Spektral signatur och gråtonsinformation i satellitbilderna samlades genom kubisk interpolering med bibehållen upplösning. Eftersom både Landsat TM och SPOT scenerna var registrerade med nära-lod vinkel krävdes ingen korrigering för terränghöjdsparallax.



Figur 5. Del av ortofoto med 1 meters bildelementstorlek (vänster), utjämnad gråton (mitten) och utjämnad skuggdensitet (höger). den senare definieras som den lägsta digitalnivån inom ett 5 x 5 meters fönster. Utjämnningen utfördes med ett Gauss filter ($s=7.0$)

Textur

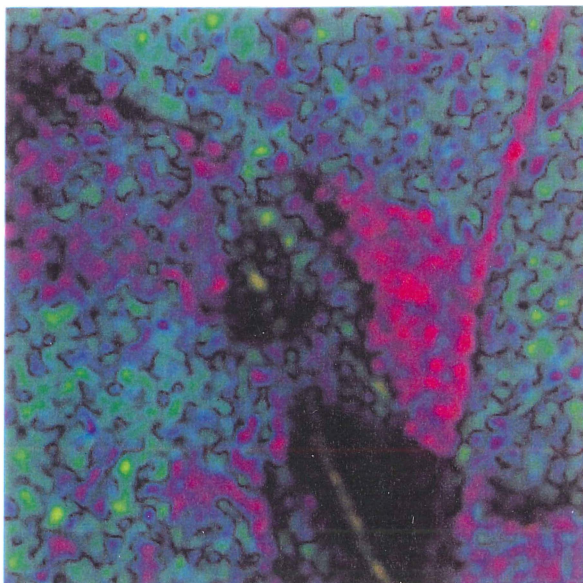
Textur i flygortofotot kvantifierades med metoder som representerar tre olika kategorier:

- Riktningsoberoende variationsmått: lokal varians
- Texturprimitiver: Roberts gradient, Hierarkiska styrbara kvadraturfilter
- Detektering av enskilda träd: Frekvens av lokala maxima av normal fördelningens 1:a derivata i belysningsriktningen. Dessutom implementerades en starkt förenklad variant av modellbaserad matchning som jämförelse (någon kvantitativ utvärdering har inte gjorts p g a tidsbrist)

Texturmåtten beräknades i ortofotot med 1 meters bildelement samt i ett fall hierarkiskt med stegvis halverad geometrisk upplösning (se kvadraturfilter nedan). Responsen utjämnades i likhet med gråtonen med ett 21 x 21 Gauss-filter. En något lägre standardavvikelse ($s = 5.0$ meter) användes eftersom texturfilter redan från början integrerar över en viss yta.

Roberts gradient

Roberts gradient är ett enkelt filter som kvantifierar skillnaden i gråton mot de närmast angränsande bildelementen. Den kan beräknas i fyra olika riktningar; horisontellt, vertikalt och två diagonaler (Gonzalez, Wintz 1987). Genom att kombinera dessa kan olika texturegenskaper härledas t ex variationsintensitet, dominerande riktning och enhetlighet (figur 6). Responsen ifrån de olika filtren användes direkt som indata i skattningsfunktionerna.



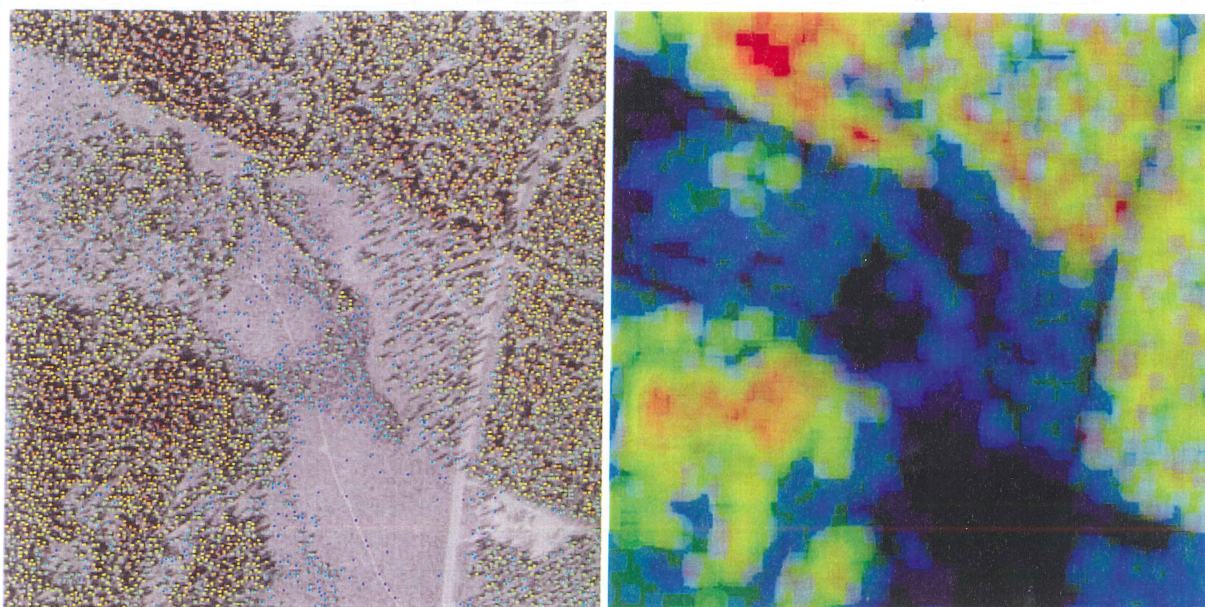
Figur 6. Roberts gradient kvantifierar gråtonens förändring mellan angränsande bildelement i fyra olika riktningar (horisontellt, vertikalt och två diagonaler). Dessa kan i sin tur kombineras för att beskriva lokal variationsintensitet, dominerande riktning och enhetlighet. Mörka områden i figuren motsvarar områden med liten variation i gråton. Färgnyansen anger dominerande riktning och färgmättnad anger graden av enhetlighet i riktningen. Notera att glesa bestånd (t ex fröträdställningar) visar starkt riktad textur i belysningsriktningen (lila områden) medan välslutna bestånd domineras av riktningen tvärs mot belysningen (gröna områden)

Styrbara kvadraturfilter

Freeman och Andersson (1991) har beskrivit en uppsättning av 7 olika basfilter grundade på normalfördelningens 2:a derivata. Basfiltrens respons kombineras linjärt till tre grundkomponenter för att ge information om texturens variationsintensitet, symmetri och fas i godtycklig riktning. Detta upprepades på bilder med successivt fördubblad storlek på bildelementen (1, 2, 4, 8 och 16 meter). Även i detta fall användes grundkomponenterna (3 st för respektive upplösning) direkt som indata till skattningsfunktionerna.

Detektering av enskilda träd med normalfördelningens 1:a derivata i belysningsriktningen och skuggdensitet

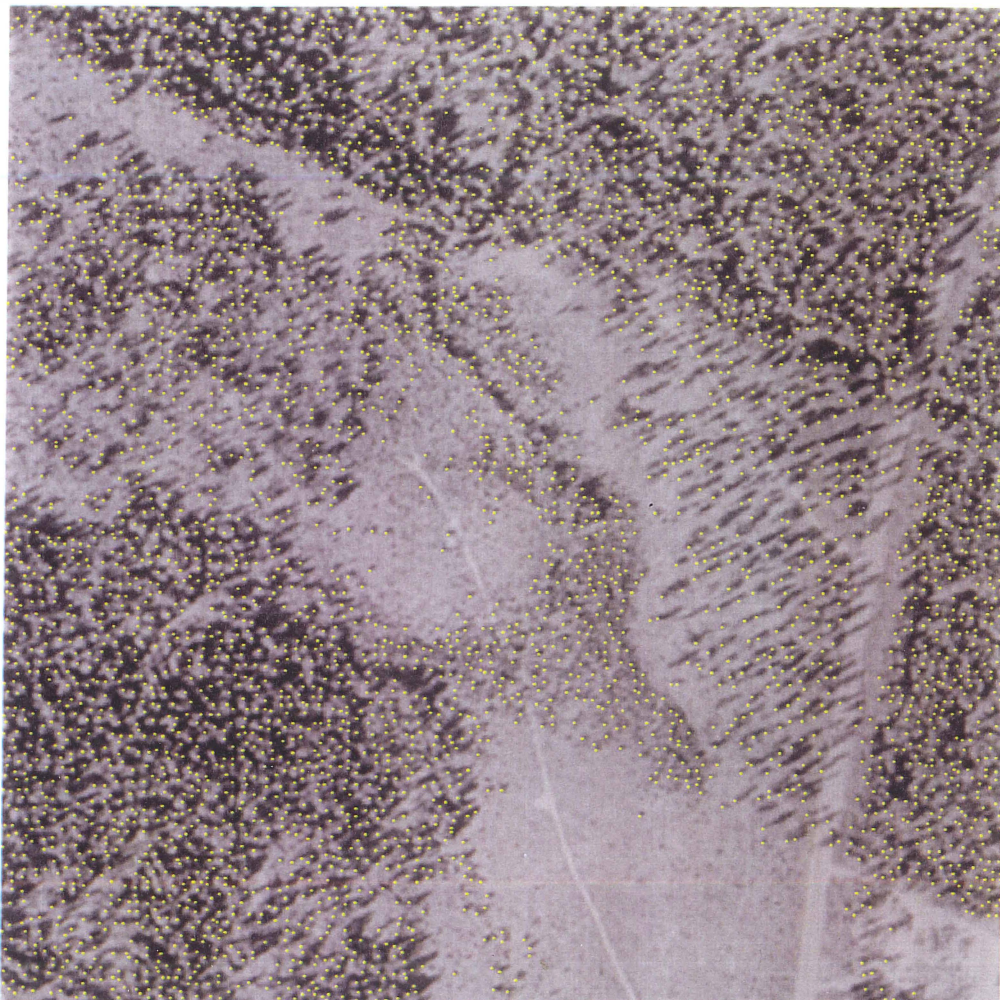
Metoden bygger på antagandet att övergången mellan trädkronornas solbelysta och beskuggade delar kan modelleras approximativt med normalfördelningens 1:a derivata. Filtrets fönsterstorlek och standardavvikelse valdes till 5 x 5 respektive 0.67 meter för att motsvara medelstora trädkronor. Villkoren för detektering var att responsen dels skulle överstiga ett tröskelvärde (som bestämdes subjektivt) dels utgöra ett lokalt maximum och att det dessutom fanns en skugga strax bortom den antagna kronans radie i belysningsriktningen. Varje detekterat maximum stratifierades i 3 klasser baserat på skuggans densitet i belysningsriktningen eftersom den relaterar till trädstorlek och trädslag. (figur 7).



Figur 7. Detektering av enskilda träd (vänster) med filter som motsvarar normalfördelningens 1:a derivata i belysningsriktningen ($s = 0.67$ meter). Varje enskilt maximum har stratifierats i 3 klasser baserat på skuggdensitet i belysningsriktningen. Färgen anger skuggans densitet; rött = mörk skugga, blått = ljus skugga. Frekvensen i respektive klass per ytenhet har därefter beräknats (höger)

Modellbaserad matchning av enskilda träd

Som jämförelse mot föregående metod implementerades modellbaserad matchning som utvecklats av Pollock (1996) i en starkt förenklad variant. Mönster för två olika kronformer (tall och gran) och fyra kronlängder (6, 12, 18 och 24 meter) genererades utifrån en geometrisk modell (generaliserad ellipsoid) samt antagande om solriktning 237° och solhöjd 45° (figur 8). Enbart sökmönster som motsvarar avbildning i lod genererades eftersom studieområdet är relativt centralt beläget i flygbilden. Även villkoren för identifiering var starkt förenklade i förhållande till Pollocks metod och baserades på att korrelationen med sökmönstren dels var lokala maxima och dels översteg de övriga mönstrens maxima som expanderats med respektive kronvidd samt att de dessutom översteg ett globalt tröskelvärde (som bestämdes subjektivt). I tillägg till den ursprungliga versionen krävdes även en skugga i belyningsriktningen bortom den aktuella kronradien.



Figur 8. Modellbaserad matchning av enskilda träd med 9 olika sökmönster som genererats utifrån en geometrisk modell för kronform samt aktuella belynings- och avbildningsförhållanden (Pollock 1997)

Skattning av beståndsegenskaper

Informationsinnehållet med avseende på beståndsegenskaper (trädslagsfördelning, virkesförråd, ålder, grundyta och medeldiameter) för olika gråtons- spektral signatur- och texturparametrar analyserades genom att jämföra skattningsnoggrannheten som respektive parameter (eller kombination) resulterade i. Som mått på överensstämmelse mellan skattade och uppmätta beståndsegenskaper användes korrelationskoefficienten som beskriver graden av linjärt samband mellan två variabler.

För att jämförelsen skall vara rättvisande är det viktigt att skattningsmetoden kräver så få modellantaganden som möjligt eftersom det till stor del saknas teori för ev. orsakssamband mellan beståndsegenskaper och textur. Metoden bör inte heller förutsätta oberoende mellan förklarande variabler eftersom många texturmått är starkt korrelerade med varandra. Vidare bör skattningsmetoden vara tillräckligt flexibel för att kunna modellera eventuellt okända samband, även olinjära och diskontinuerliga sådana. Under dessa förutsättningar är regressionsanalys olämplig som skattningsmetod eftersom resultaten skulle riskera att i första hand spegla hur pass korrekta modellantaganden som gjorts i respektive fall istället för att belysa informationsinnehållet i de olika bildparametrarna.

Neurala nätverk

Artificiella neurala nätverk (ANN) är en skattningsmetod som uppfyller ovanstående kriterier. ANN baseras på principer som återfinns i biologiska nervsystem, vilka består av många nervceller (neuroner) som är sammankopplade med riktade länkar (synapser) (Rumelhart 1958). De enskilda nervcellernas funktioner är relativt enkla och likartade. Systemens komplexa funktion bestäms framförallt av förbindelserna mellan neuronerna. I ANN modelleras de enskilda nervcellerna av så kallade processelement (PE) som arrangeras i skikt. Varje PE beräknar en viktad summa av andra PE i föregående skikt. Varje förbindelse mellan PE har en egen vikt. Den viktade summan transformeras med en överföringsfunktion som i allmänhet är s-förmad. Den transformerade summan förmedlas därefter vidare till samtliga PE i nästa skikt (Haykin 1994). Det första skiktet utgörs av PE som representerar olika förklarande variabler. I det sista skiktet motsvarar varje PE en beroende variabel. Ett enda nätverk kan alltså beräkna flera olika resultat parallellt. Graden av komplexitet bestäms av antalet PE och skikt. En fördel med neurala nätverk är att de kan modellera såväl linjära som

olinjära och diskontinuerliga samband och hantera både kontinuerliga och diskreta (klassindelade) variabler samtidigt. Dessutom krävs inga antaganden om fördelning eller oberoende mellan förklarande variabler.

En av de vanligaste metoderna för att anpassa förbindelsernas vikter (träning av nätverket) för att uppnå önskad funktion är sk Back-propagation (Rumelhart 1986). Back-propagation innebär upprepad presentation av exempel på indata och önskade resultat (träningsdata). Förbindelsernas vikter modifieras stokastiskt i proportion till hur stor del av skillnaden mellan faktiskt och önskat resultat som kan hänföras till respektive förbindelse. Eftersom metoden är stokastisk och iterativ blir lösningen endast approximativt optimal och noggrannheten kan bero på hur många iterationer som genomförs och hur snabbt som vikterna modifieras. I likhet med andra skattningsmetoder finns även risk för överanpassning d v s att det tränade nätverket kan återge exemplen i träningsdata med god noggrannhet men fungerar dåligt på nya exempel. Därför bör nätverkets skattningsförmåga utvärderas med hjälp av ett oberoende dataset.

Programvaran som använts i denna studie var Neural Works II Professional version 4.0 (Neural Ware 1991). Olika nätverk som beräknar beståndsegenskaper (trädslagsfördelning, virkesförråd, ålder, grundyta och diameter) parallellt utifrån olika kombinationer av gråton, spektral signatur och textur har utvecklats med hjälp av exemplen i träningsdatasetet. Nätverkens skattningsförmåga utvärderades med hjälp av utvärderingsdatasetet. De modifieringar av back-propagation metoden som rekommenderas av Neural Ware har använts eftersom de visade sig vara mer robusta än den ursprungliga varianten. Viktuppdateringen baserades på "Normalized-cumulative-delta-rule" som påstås vara mer resistent mot brus i indata och minskar risken för överanpassning. Som överföringsfunktion användes hyperbolic tangent istället för sigmoid eftersom den gav snabbare och säkrare konvergens. En likartad struktur användes överlag för samtliga nätverk med mellan 9-25 PE i mellanskiktet beroende på antalet förklarande variabler. Endast nätverk med ett mellanskikt användes eftersom Neural Wares tumregel för nätverksdesign var att ett skikt oftast räcker. Med de rekommenderade inställningarna konvergerade lösningarna utan problem i samtliga fall. Vikterna stabiliserades oftast redan efter ca 10 000 iterationen. Noggrannheten förbättrades därefter något upp till 150 000 iterationer utan att tendenser till överanpassning kunde noteras. Vid jämförande försök

med den ursprungliga versionen av back-propagation med delta-rule och sigmoid överföringsfunktion konvergerade lösningarna märkbart långsammare. Dessutom uppstod ibland tendenser till överanpassning.

Resultat

Gråton

Gråtonen i både flyg- och satellitbilden visade starkare samband med virkesförråd, diameter och grundyta samt andelen tall och gran än för ålder och lövandel (tabell 4). Sambanden för virkesförråd, grundyta samt andelen tall och gran var klart starkare för SPOT P än för flygbildens gråton medan förhållandet var omvänt för ålder och diameter.

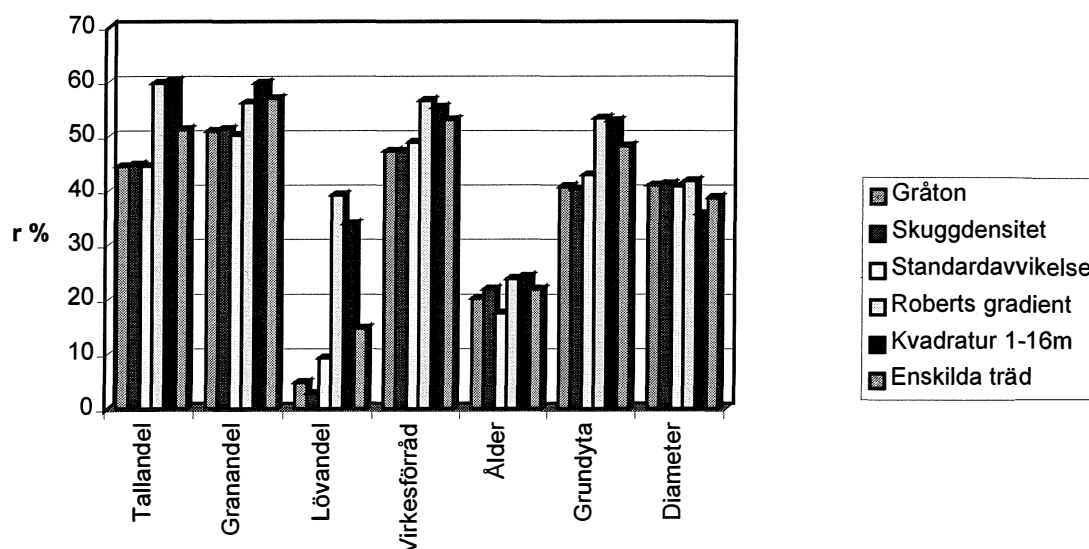
Tabell 4. Skattningsnoggrannhet (korrelationskoefficient %) på provytenivå för olika uppsättningar av bildparametrar. Skattningsfunktionerna utgörs av neurala nätverk av backpropagation-typ. Separata dataset har använts för träning av nätverken (n = 369) och utvärdering av skattningsnoggrannhet (n = 263)

Parameter	Tallandel	Granandel	Lövandel	Virkesförråd	Ålder	Grundyta	Diameter
Gråton	44.5	50.9	4.8	47.3	20.2	40.7	41.0
Skuggdensitet + gråton	44.8	51.3	2.8	47.3	21.9	40.3	41.2
Standardavvikelse + gråton	44.5	50.2	9.3	48.9	17.5	42.9	40.8
Roberts gradient + gråton	59.7	56.1	39.2	56.5	23.8	53.3	41.8
Styrbara kvadraturfilter 1-16m + gråton	60.1	59.7	33.9	55.3	24.2	52.8	35.7
Frekvens enskilda träd + gråton	51.2	56.9	14.7	53.0	21.9	48.2	38.7
Roberts + ensk. träd + gråton	59.4	60.2	33.2	58.4	25.7	55.5	34.2
SPOT P	51.6	55.6	3.6	54.6	12.5	49.1	25.8
SPOT XS	66.0	58.8	50.4	50.8	15.6	45.2	25.3
SPOT P + XS	67.7	61.8	50.6	55.0	18.1	49.5	31.0
Landsat TM	73.3	71.9	55.8	63.0	20.9	58.5	36.5
Roberts + Landsat + gråton	74.8	71.7	59.1	66.1	31.7	62.2	44.4
Ensk. träd + Landsat TM + gråton	74.0	71.8	57.2	63.0	23.1	57.6	40.1

Textur

Standardavvikelse och skuggdensitet förbättrade inte skattningarna märkbart i förhållande till enbart gråton. Däremot erhöles en tydlig förbättring med hjälp av Roberts gradient och de

hierarkiska styrbara kvadraturfiltren som var ungefär likvärdiga. Frekvensen av enskilda-träd detekterade med normalfördelningens 1:a derivata i belysningsriktningen gav genomgående något sämre skattningsnoggrannheter än Roberts gradient och kvadraturfiltren utom för lövandelen där den var avsevärt lägre (figur 9).

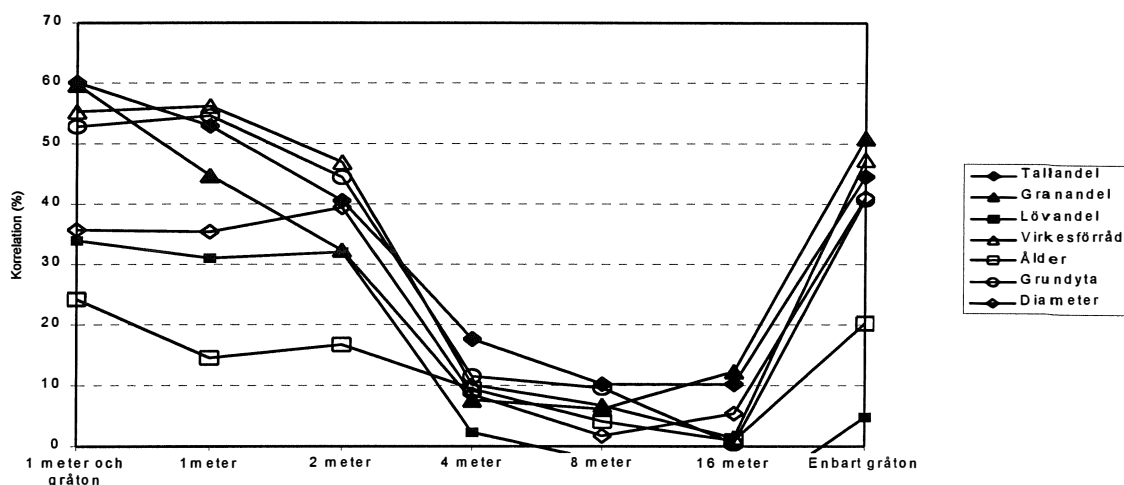


Figur 9. Skattningsnoggrannhet (korrelationskoefficient %) för gråton och olika typer av texturmått beräknade för ett pankromatiskt flygortofoto med 1 meters bildelementstorlek (n=263)

En visuell jämförelse mellan detektering av enskilda träd med normalfördelningens 1:a derivata och modellbaserad matchning visar att den senare ger något noggrannare identifiering och tycks vara mer anpassningsbar till olika trädstorlekar och avstånd mellan trädskronorna. Ingen av metoderna klarade dock av att identifiera kronorna på fristående frötallar om bakgrunden är solbelyst.

Upplösning

Sambandet mellan textur och beståndsegenskaper visar en mycket tydligt tröskeleffekt mellan 2 och 4 meters upplösning (tabell 5, figur 10). Skillnaden är även tydlig mellan 1 och 2 meter. Informationstillskottet från textur (jämfört med gråton) i bilddata med 4 meters upplösning är marginell utom för skattningen av andelen tall.



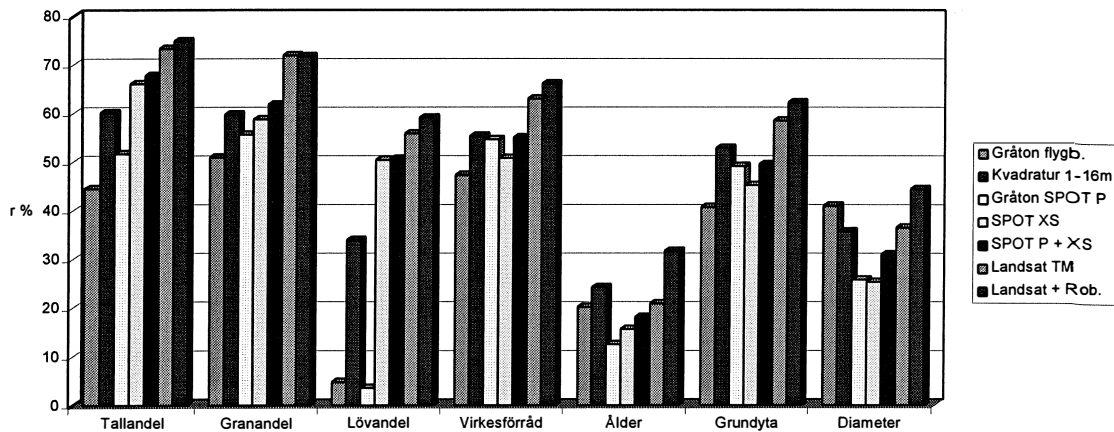
Figur 10. Skattningsnoggrannhet (korrelationskoefficient %) med textur vid olika bildelementstorlek. Som texturmått användes styrbara kvadraturfilter (Freeman, Adelson 1991) hierarkiskt för samtliga bildelementstorlekar upp till och med 16 meter (1-16, 2-16, 4-16 osv) (n=263)

Tabell 5. Skattningsnoggrannhet vid olika geometrisk upplösning. Ortofotoets textur kvantifierades hierarkiskt i successivt halverade upplösningsssteg med hjälp av styrbara kvadraturfilter baserade på normalfördelningens 2:a derivata (Freeman, Andersson 1991)

Parametrar	Tallandel	Granandel	Lövandel	Virkesförråd	Ålder	Grundyta	Diameter
1-16m	52.9	44.7	31.0	56.2	14.5	54.6	35.4
2-16 m	40.5	32.3	32.0	46.9	16.7	44.4	39.4
4-16 m	17.6	7.6	2.3	10.1	9.4	11.5	8.5
8-16 m	10.2	6.1	-2.4	6.7	4.1	9.6	1.7
16m	10.2	12.3	-10.2	1.4	0.9	0.4	5.4
1-16m + gråton	60.1	59.7	33.9	55.3	24.2	52.8	35.7
2-16 m + gråton	53.4	54.1	32.9	47.8	21.4	44.1	37.5
4-16 m + gråton	48.7	54.5	-0.4	44.1	20.3	39.6	33.0
8-16 m + gråton	48.4	54.5	-0.5	45.4	18.6	40.3	33.7
16m + gråton	46.6	55.0	-4.7	46.4	19.5	39.1	41.6
Gråton	44.5	50.9	4.8	47.3	20.2	40.7	41.0

Spektral signatur

Den spektral signaturen i både SPOT XS och Landsat TM data gav klart högre skattningsnoggrannhet för trädslagsfördelning (framförallt lövandel) än de olika texturmåtten (tabell 4, figur 11). Landsat TM ger klart bättre skattningar än SPOT XS+P för samtliga variabler och även bättre skattningar av virkesförråd och grundyta än texturmåtten. Däremot skattas inte ålder och diameter lika väl med spektral signatur som med textur.



Figur 11. Jämförelse mellan textur i flygbilder och spektral signatur i satellitbilder samt gråton (korrelation % mellan skattade och uppmätta värden på provtytor, n=263)

Kombinationseffekter

Kombination av spektral signatur och textur resulterade i en markant förbättring av skattningsnoggrannheten där Landsat TM + Roberts gradient var bäst av samtliga variabelkombinationer. SPOT XS och SPOT P gav tillsammans något bättre skattning av ålder och diameter än var för sig. Roberts gradient och trädfrekvens i kombination förbättrade endast skattningarna marginellt.

Diskussion

De neurala nätverken tycks kunna modellera de samband som förekommer i de olika kombinationerna av förklarande variablerna utan att några antaganden om samband mellan de olika variablerna behöver göras. Det är intressant att de olika grundkomponenterna för Roberts gradient (4 st) och kvadraturfiltren (3x5 st) kunde användas direkt som förklarande variabler utan att först kombineras till faktorer som variationsintensitet, orientering, symmetri och frekvens. Detta utesluter naturligtvis inte att det kan vara fördelaktigt att transformera indata till mer logiska enheter, i synnerhet om indata kan kondenseras eftersom det reducerar antalet vikter som behöver beräknas. Skillnaderna som observerades mellan den "klassiska" back-propagation metoden och den brusresistenta variant som rekommenderas av Neural Ware antyder att en del av de problem med instabilitet och överanpassning som rapporterats i andra fjärranalysstudier (Ardö *et al.* 1997) kan undvikas genom att välja robusta metoder för att träna nätverken.

Vad gäller skattningsnoggrannheten på provyte- och beståndsnivå så är det möjligt att direkt jämföra resultaten i denna studie med en tidigare undersökning som baseras på samma fält- och bildata men där skattningsfunktionerna utvecklades med en linjär multipel regressionsanalys (Hagner 1990). Det visar sig att skattningarna baserade på neurala nätverk var bättre än motsvarande regressionsfunktioner (tabell 6). Skattningsfunktionerna i den tidigare studien utvärderades även på beståndsnivå (9 objektivet inventerade bestånd) och jämfördes med 21 professionella skogsinventerare som använde konventionell relaskopinventering. Det visade sig att de satellitbildsbaserade skattningarna var bättre för trädslagsblandning (i synnerhet lövandel), ungefär likvärdiga för virkesförråd och något sämre för medeldiameter. Noggrannheten låg inom det centrala 50% intervallet av försökspersonerna för samtliga variabler. Eftersom noggrannheten med motsvarande neurala nätverk i denna studie är bättre och kombinationen av spektral signatur i satellitbilder och textur i flygbilder avsevärt förbättrar skattningen av medeldiameter är det troligt att noggrannheten väl motsvarar konventionell skogsinventering även när det gäller trädstorlek. Det bör påpekas att studien gäller ett relativt begränsat geografiskt område med i stort sett enhetliga atmosfärsförhållanden. För att uppnå motsvarande noggrannhet med starkt utspridda referensdata (t ex riksskogstaxeringens provytor) måste variationen i atmosfärsförhållanden inom satellitscenen modelleras.

Tabell 6. Skattningsnoggrannhet (korrelationskoefficient %) för regressionsfunktioner (Hagner 1990) och neurala nätverk på provytenivå (262 st). Inom parentes anges medelfel på beståndsnivå i relation (%) till konventionell relaskopinventering (Hagner 1990)

Skattningsmetod	Tallandel	Granandel	Lövandel	Virkesförråd	Diameter
Regressionsfunktion					
Landsat-TM	70 (76)	69 (68)	59 (86)	57 (106)	35 (120)
Neuralt nätverk					
Landsat-TM	73	72	56	63	36
Landsat-TM + textur	75	72	59	66	44

Skattningsnoggrannheten med enbart gråton (i både flygbild och satellitbild) var som förväntat bäst för virkesförrådet eftersom den innefattar både slutenhet och trädstorlek vilka är de faktorer som påverkar gråtonen mest. Att även noggrannheten för gran- och tallandelen visar förhållandevis höga värden beror troligtvis på skillnader i kronform och täthet mellan trädslagen samt att förhållandet mellan gran- och tallandel råkar samvariera med

virkesförrådet inom området. Som väntat var möjligheten att skatta andelen lövträd med enbart gråton obefintlig eftersom lövträd liknar tall i pankromatiska bilder och dessutom har lövandelen låg korrelation med andra faktorer som påverkar gråtonen. Skillnaderna i skattningsnoggrannhet mellan gråton i SPOT P och flygbilden med avseende på slutenhet och trädstorlek är tvetydig. Den kan möjligen bero på att satellitbilden till skillnad ifrån flygbilden har praktiskt taget konstant avbildningsgeometri inom området och därigenom bättre förutsättningar för att kvantifiera slutenheten. Flygfotot har dock avsevärt bättre gråtonsdynamik än satellitbilden vilket möjligen förbättrar möjligheterna att skatta variabler som relaterar till trädstorlek (diameter och ålder). Skillnaderna kan även bero på att gråtonen integrerats över något olika stora ytor i flyg- respektive satellitbilden och hur väl dessa råkar motsvara relaskopyornas utbredning som ju varierar med trädstorleken.

Att lokal standardavvikelse och skuggdensitet inte tycks förbättra noggrannheten alls i förhållande till gråton var något förvånande eftersom de förväntades vara mer relaterade till trädstorlek och trädslag än gråton (Cohen 1990, Woodcock 1988, Hyppänen 1996).

Den goda skattningsnoggrannhet som uppnås med de fyra riktade filtren i Roberts gradient visar att texturens orientering är en viktig komponent som framförallt relaterar till beståndets slutenhet och trädslagsfördelning. Ett överraskande resultat var att även andelen löv kunde skattas relativt väl. Filtren som är mycket enkla att implementera i de flesta bildbehandlingssystem gav likvärdiga resultat med de mer komplexa styrbara hierarkiska kvadraturfiltren. Texturens periodicitet (frekvens) och fas tycks alltså inte vara särskilt betydelsefulla faktorer i detta fall vilket naturligtvis inte utesluter att det kan vara värdefull information i andra sammanhang t ex vid skattning av stamantal. Det är möjligt att kvadraturfiltrens respons skulle vinna på att kondenseras till färre logiska komponenter än vad som var fallet i denna studie.

Även frekvensen av enskilda träd detekterade med normalfördelningens 1:a-deriva tillförde information utöver den som finns i gråtonen. Skattningsnoggrannheten är dock genomgående lägre än för Roberts- och kvadraturfiltren, i synnerhet för andelen löv och de storleksrelaterade måtten (diameter och ålder). En orsak kan vara att stratifieringen i storleksklasser med hjälp av skuggdensitetet var alltför grov och inte relaterar direkt till

trädslag. Frekvensmättet saknar dessutom information om orientering och form på skuggor som till viss del återges av andra texturmått. Att andelen lövträd inte kunde skattas var väntat eftersom de identifierade trädkronorna inte klassificerades med avseende på trädslag. Metoden kan säkert vidareutvecklas ytterligare genom att varje identifierad krona även tilldelas ett storleksmått genom att variera storleken på sökmönstret. Tyvärr kunde inte frekvensmättets eventuella samband med stamantalet per ytenhet utvärderas eftersom inventeringens utformning var olämplig för beräkning av stamantal.

Den noggrannare identifieringen av trädkronor med modellbaserad matchning var förväntad och tyder på att dessa sökmönster är bättre anpassade än normalfördelningens 1:a derivata, även i avbildningsvinklar nära lod. Problemet med att identifiera fristående tallar beror sannolikt på att de relativt öppna kronornas kontrast mot marken är i det närmaste obefintlig i pankromatiska bilder och att de inte heller uppfyller kravet på anslutande skugga eftersom den höga kronan orsakar ett glapp mellan krona och skugga i bilden. Sökmönstren bör alltså kompletteras med en motsvarighet för den projicerade skuggan. En komplikation är i så fall att matchningen måste ta hänsyn till avskärmningseffekter från angränsande träd. Detektering av fristående träd bör även kunna förbättras genom att omfatta matchning av spektral signatur som kan uppvisa större kontrast mellan krona och bakgrund, i synnerhet ifall marken täcks av avverkningsrester eller vegetation som domineras av lingon, ljung, kråkris och lavar. En ytterligare vidareutveckling av Pollocks metod vore att utnyttja flera betraktningsriktningar (stereo) i matchningsprocessen som därigenom skulle kunna bli än mer robust.

Den tydliga tröskeeffekten i skattningsnoggrannhet mellan 2 och 4 meters bildelementstorlek indikerar att det skogliga informationsvärdet av textur i dagens satellitbilder med upplösning upp till 6 meter (IRS-1) är ytterst begränsat. Det är först när upplösningen närmar sig 1 meter som texturen blir verkligt användbar. Undantaget tycks vara andelen tall som till viss del kan skattas även i lägre upplösning. Förmodligen är det frågan om öppen tallhed med sitt karakteristiska mönster av trädgrupper och luckor i beståndet som kan identifieras. Resultaten överensstämmer med både teoretiska och empiriska studier av gråtonens rumsliga variation i högupplösande fjärranalysbilder. Hyppänen (1996) noterar att den lokala variansen mellan angränsande bildelement tycks kulminera vid en upplösning på 2 meter för rött och 3 meter för grönt och infrarött ljus i liknande typ av skog. Hans resultat visar också att det mesta av

gråtonens samvariation avklingat efter 5-7 meter i medelålders och äldre skog. Mot bakgrund av den tydliga skillnaden mellan 1 och 2 meters upplösning bör flygfoton digitaliseras med åtminstone 1 meters bildelement för att inte viktig texturinformation skall gå förlorad. Även denna upplösning är sannolikt i underkant eftersom det är svårt att urskilja de enskilda trädkronornas form. Dessutom saknas helt den textur inom trädkronorna som visat sig vara viktig för identifiering av trädslag (Brantberg 1994, Pollock 1997). Pollocks resultat visar på avsevärda skillnader i identifieringsnoggrannhet mellan bilder med 0.3 och med 0.7 meters storlek på bildelementen. Den främsta svårigheten med att utnyttja bilddata med högre upplösning är den fyrfaldiga ökningen av datamängden vid halverad storlek på bildelementen.

Av de spektrala signaturkomponenterna är det framförallt det när-infraröda bandet som möjliggör en förbättrad skattning av trädslagsfördelning och i viss mån även slutenhet. Den främsta orsaken torde vara att kontrasten mellan olika vegetationstyper och trädslag är störst inom detta våglängdsområde. Skattningarna bygger dock till stor del på indirekta samband mellan trädslagsfördelning och fältskiktets sammansättning samt beståndets geometriska struktur eftersom den solbelysta delen av trädkronorna i allmänhet endast utgör en mindre del av den avbildade ytan. Skillnaden i spektral signatur mellan löv- och barrträd beror dessutom mer på kronans geometriska struktur än av barrens och lövens reflektionsegenskaper (Guyot, Guyon 1989). Resultaten understryker fältskiktets och beståndsstrukturens betydelse genom att det framförallt är de trädslagsrena bestånden med avvikande fältskikt (t ex tallhed med lav) och äldre välsluten granskog (med typisk struktur) som kunde identifieras med god noggrannhet. I blandbestånden med fältskikt av blåbärstyp tycks inte proportionerna mellan gran och tall kunna skattas alls, varken med spektral signatur eller statistiska texturmått. Detta innebär att en markant förbättrad skattning av trädslagsfördelning sannolikt kräver att varje trädkrona analyseras separat vilket i sin tur kräver en upplösning på minst 1 meter.

Landsat TM sensors sämre geometriska upplösning i jämförelse med SPOT XS kompenseras mer än väl av den större spektrala upplösningen. Framförallt de mellan-infraröda banden tillför ytterligare dimensionalitet till signaturen. Dessutom har de infraröda banden avsevärt bättre dynamik än de synliga och påverkas mindre av atmosfären.

Kombinationseffekten av SPOT:s pankromatiska och multispektrala band tyder på att skattningen av trädstorlek som i huvudsak baseras på gråtonen i SPOT P till viss del kan justeras med hjälp av spektral information för skillnader mellan de olika trädslagens och fältskiktets inverkan på gråtonen.

Den avsevärda kombinationseffekten mellan spektral signatur och textur förklaras av att specifik information om trädstorlek i stor sett saknas p g a den låga geometriska upplösningen i satellitbilder. Genom att texturen tillför denna dimension förbättras även möjligheterna att tolka den spektrala signaturen i termer av slutenhet och trädslagsfördelning. Den tydliga kombinationseffekten överensstämmer dock inte med erfarenheterna ifrån en studie av Holmgren et al (1995) där möjligheten att skatta beståndsegenskaper (virkesförråd, lövandel och prioritet för avverkning) med hjälp gråton, spektral signatur och textur (baserad på co-occurrence matriser) i digitaliserade flygbilder testades. Resultaten i den studien pekade på ett ytterst marginellt informationstillskott ifrån de undersökta texturparametrarna. En möjlig förklaring kan vara svårigheter att upptäcka och modellera de okända sambanden mellan alla texturparametrar (48 st) med hjälp av regressionsanalys. Dessutom undersöktes inte de variabler som direkt relaterar till trädstorleken (t ex diameter och ålder) som tycks vara den dimension där kombinationseffekten är tydligast. Det är även tveksamt ifall de undersökta texturparametrarna var lämpliga för att kvantifiera texturens riktningsinformation som enligt denna studie tycks stå för den mesta av informationsinnehållet.

Fjärranalysmetoder som begränsas av avbildningsgeometri och påverkas av gråtonsnivån är knappast lämpliga för praktisk användning eftersom det innebär att separata referensdata måste anskaffas för varje bild. Även om flygbilder av höghöjdstyp (9200 meters flyghöjd) används så är ytan med mindre än 15° avvikelse ifrån lodavbildning inte större än ett område med 2.5 km radie. Vid fotografering ifrån normalhöjd (4600 meter) minskar ytan till en ¼-del. Ur praktisk synvinkel är därför metoder som grundar sig på modellbaserad matchning av enskilda träd att föredra istället för de statistiska metoderna eftersom de förra kan användas över en större del av bildytan och sannolikt kan kalibreras med ett mindre dataset. Dessutom har enskilda träd baserade data ett klart större informationsvärde än medeltal per ytenhet och möjliggör dessutom helt nya typer av analys- och planeringsmetoder.

Resultaten visar att texturen framförallt tillför information om trädstorlek i förhållande till spektral signatur i satellitbilder. Eftersom trädstorleken även kan mätas effektivt genom höjdmätning och tolkning i stereoinstrument och dessutom kan skattas någorlunda enkelt vid subjektiv fältinventering är ett alternativ till de statistiska texturmåtten att i stället utnyttja det vanliga beståndsregistret för kombinationsskattningar (Hagner 1990). Generella skattningsfunktioner kan utvecklas med hjälp av data ifrån riksskogstaxeringens provytor och därefter kalibreras lokalt med hjälp av ett mindre dataset på beståndsnivå. Ifall robusta algoritmer för analys av textur i flygbilder (som tar hänsyn till belysnings och avbildningseffekter m m) utvecklas kan även dessa utnyttjas inom samma ram.

Det fortsatta arbetet med utveckling av skattningsmetoder baserade på digital analys av högupplösande fjärranalysbilder bör i första hand inriktas på att vidareutveckla Pollocks metod för modellbaserad matchning av enskilda träd och i andra hand utveckla de statistiska texturmåtten för att ta hänsyn till effekter av varierande avbildnings- och belysningsgeometri samt skillnader i grå- och färgton mellan enskilda bilder, gärna i kombination med spektral signatur i satellitbilder. Även möjligheten att utnyttja mätning och tolkning i stereoinstrument samt det befintliga beståndsregistret i kombination med spektral signatur i satellitbilder bör undersökas. Det vore även värdefullt att belysa i vilken mån som stamantal och trädstorleksfördelning kan skattas med hjälp av högupplösande bilddata.

Slutsatser

Textur i flygbilder i kombination med spektral signatur i satellitbilder kan ge en skattningsnoggrannhet på beståndsnivå för trädslagsfördelning (tall, gran, löv), virkesförråd och diameter som är likvärdig med konventionell relaskopinventering.

Kombinationen av textur och spektral signatur ger väsentligt högre skattningsnoggrannhet än de enskilda komponenterna var för sig.

Artificiella neurala nätverk kan användas för att modellera sambanden mellan textur, spektral signatur och beståndsegenskaper.

Texturens orientering är en viktig komponent för skattning av beståndsegenskaper.

Bilddata bör ha minst 1 meters upplösning för att inte viktig texturinformation skall förloras.

Enskilda trädkronor kan identifieras i bilddata med 1 meters upplösning.

Modellbaserad matchning av enskilda träd har större potential än statistiska texturmått för praktisk inventering eftersom den kompenserar för varierande avbildningsgeometri och belysningsförhållanden och dessutom ger mer detaljerad information om beståndets sammansättning.

Referenser

- Alm G. 1985. Kantbevarande variansmått för segmentering av markklasser i digitala flygbilder. Proceedings SSAB symposium i Bildanalys, KTH, Stockholm 19-20 mars, sid. 41-46.
- Ardö J. 1991. Sambandet mellan Landsat TM-data och skoglig produktivitet i södra Sverige. SGÅ,
- Barnsley M. J., Barr S. L. 1996. Inferring Urban Land Use from Satellite Sensor Images using Kernel-Based Spatial Reclassification. PE&RS vol. 62, No. 8, pp. 948-958
- Bock S. 1996. A Region Based Approach to Land-Use Classification of Remotely-Sensed Image Data Using Artificial Neural Networks. In: Kraus K. Waldhäus P. (ed.) International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS, Vol. XXXI, Part B7, pp. 71-76.
- Brantberg T. 1994. Analys av skog i högupplösta digitala bilder. Centrum för Bildanalys, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Rapport nr. 17, 32 p.
- Bårman H., Haglund L., Granlund G. Context Dependent Hierarchical Image Processing for Remote Sensing Data - Contextual Classification and Segmentation. Project Report, Computer Vision Laboratory, Linköping University, Sweden.
- Cohen W. B., Spies T. A., Bradshaw G. A. 1990. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure. Remote Sensing of Environment, Vol. 34, pp. 167-178.
- Cross G. R. 1983. Markov Random Field Texture Models. IEEE Patt. Anal. Machine Intell., vol. PAMI-5, No. 1, pp. 25-40.
- Dralle K., Rudemo M. 1996. Stem number estimation by kernel smoothing of aerial photos. Can. J. For. Res. Vol. 26. pp. 1228-1236

Dralle K. 1997. Locating Trees by digital Image Processing of Aerial Photos. Report No. 58 Dina, Royal Veterinary and Agricultural University Denmark.

Franklin S. E., Wulder M. A., Lavigne M. B. 1996. Automated derivation of geographic windows for use in remote sensing digital image texture analysis. *Computers & Geosciences*, June issue.

Freeman W. T., Adelson E. H. 1991. The Design and Use of Steerable Filters *IEEE Patt. Anal. Machine Intelligence*, vol. 13, No. 9, pp. 891-906.

Gong P., Pu R., Yu B. 1997. Conifer Species Recognition: an Explanatory Analysis of *In Situ* Hyperspectral Data. *Remotes Sens. of Environ.* 62:189-200.

Gonzalez R. C., Wintz P. 1987. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley.

Gougeon F. A., Moore T. 1989. Classification individuelle des arbres à partir d'images à haute résolution spatiale. In: *Teledetection et gestion des ressources*, 6e congrès de L'association québécoise de télédetection, Brenier M. *et al.* (eds), may 4-6, 1988, Sherbrooke, Quebec, Vol VI, pp 185-196.

Gougeon F. 1995. A Crown-Following Approach to the Automatic Delineation of Individual Tree Crowns in High Spatial Resolution Aerial Images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol 21, pp 274-284.

Gougeon F. 1996. Vers l'inventaire forestier automatisé reconnaître l'arbre ou la forêt? In: *Proceedings of the 9^{ème} Congrès de L'Association québécoise de télédétections*, Québec 1-3 may, 10 p.

Guyot G., Guyon D. 1989. Factors Affecting the Spectral Response of Forest Canopies: A Review. *Geocarto International* Vol. 3. PP 3-18.

Hagner O. 1987. Filters for Segmentation of Forest Management Units and Detection of Roads Using Satellite Imagery. *Proceedings of the 5th Scandinavian Conference on Image Analysis*, Stockholm, SSAB/IAPR, pp. 287-294.

Hagner O. 1990. Computer aided stand delineation and inventory based on satellite remote sensing. In: *The Usability of Remote Sensing for Forest Inventory and Planning*, Sylvander R., Poso S. (ed.) Remote Sensing Laboratory, Swedish University of Agricultural Sciences, Report 4. ISSN 1100-77X, ISBN 91-576-4208-7

Haykin S. 1994. *Neural Networks*. Macmillan, New York.

Holmgren P., Thuresson T., Holm S. 1995. Estimating Forest Parameters in Scanned Aerial Photographs with respect to Requirements for Economical Management Planning. Report 31. Section of Forest Mensuration and Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden.

Hyppänen H. 1996. Spatial autocorrelation and optimal spatial resolution of optical remote sensing data in boreal forest environment. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 17, no 17, pp. 3441-3452.

Hägglund B., Lundmark J. E. 1982. Handledning i bonitering med Skogshögskolans boniteringssystem. Skogsstyrelsen, del 1, 53 sid. ISBN 91-85748-11-0

Karlsson K. G. 1997. An Introduction to Remote Sensing in Meteorology. SMHI, Norrköping Sweden, pp. 315

Laws K. 1980 Texture image segmentation. Ph.D. dissertation, Dept of Engineering, University of Southern California.

Loetsch F. Zöhrer F., Haller K. E. 1973. Forest inventory, BLV.

Neural Ware 1991. Neural Works Reference manual. Neural Ware Inc. Pittsburgh, PA, 15276 USA.

Nämnden för skoglig flygbildsteknik 1980. Flygbildsteknik och fjärranalys. Skogsstyrelsen. Jönköping.

Pinz A. J. 1991. A Computer Vision System for the Recognition of Trees in Aerial Photographs. In: *Multisource Data Integration in Remote Sensing*, Tilded, T. (ed.), NASA Conf. Pub. 3099, pp. 111-124.

Pollock. R. 1997. Ph.D. dissertation, Department of Computer Science, University of British Columbia, Canada

Rosenblatt F. 1958. The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, 65, pp. 386-408.

Rumelhart D. E., Hinton G. E. and Williams R. J. 1986. Learning Internal Representations by Error Propagation. In: Rumelhart D. McClelland J. L. (eds.). *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, Vol. 1. MIT Press, Cambridge, MA-USA, pp. 318-362.

Shao J., Förstner W. 1994 Gabor wavelets for texture edge extraction. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXX Part 3/2, pp. 745-752.

Skogsstyrelsen 1982. Instruktion för datainsamling vid Översiktlig Skogsinventering och skogsbruksplanläggning 1982.

Söderberg, U. 1976. Funktioner för skogliga produktionsprognoser. SLU, avdelningen för skogsuppskattning och skogsindelning, Rapport 14, 251 sid.

Woodcock C. A., Strahler A., Jupp D. 1988. The Use of Variograms in Remote Sensing: I Scene Models and Simulated Images. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 25, pp. 323-348.

Åge P. J. 1983. Mätning och tolkning i flygbilder för skogsinventering. Lantmäteriverket, Rapport 1983:5, 44 sid.

Serien Arbetsrapporter utges i första hand för institutionens eget behov av viss dokumentation.

Författarna svarar själva för rapporternas vetenskapliga innehåll.

- 1995 1 Kempe, G. Hjälpmedel för bestämning av slutenhet i plant- och ungskog.
ISRN SLU-SRG-AR--1--SE
- 2 Riksskogstaxeringen och Ståndortskarteringen vid regional miljöövervakning.
- metoder för att förbättra upplösningen vid inventering i skogliga avrinningsområden.
ISRN SLU-SRG-AR--2--SE.
- 3 Holmgren, P. & Thuresson, T. Skoglig planering på amerikanska västkusten - intryck
från en studieresa till Oregon, Washington och British Columbia 1-14 augusti 1995.
ISRN SLU-SRG-AR--3--SE.
- 4 Ståhl, G. The Transect Relascope - An Instrument for the Quantification of Coarse
Woody Debris. ISRN SLU-SRG-AR--4--SE.
- 5 Törnquist, K. Ekologisk landskapsplanering i svenskt skogsbruk - hur började det?.
Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning.
ISRN SLU-SRG-AR--5--SE.
- 1996 6 Persson, S. & Segner, U. Aspekter kring datakvaliténs betydelse för den kortsiktiga
planeringen. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning.
ISRN SLU-SRG-AR--6--SE.
- 7 Henriksson, L. The thinning quotient - a relevant description of a thinning?
Gallringskvot - en tillförlitlig beskrivning av en gallring? Examensarbete i ämnet
skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--7--SE.
- 8 Ranvald, C. Sortimentinriktad avverkning. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning
och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--8--SE.
- 9 Olofsson, C. Mångbruk i ett landskapsperspektiv - En fallstudie på MoDo Skog AB,
Örnsköldsviks förvaltning. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogs-
indelning. ISRN SLU-SRG-AR--9--SE.
- 10 Andersson, H. Taper curve functions and quality estimation for Common Oak
(*Quercus Robur* L.) in Sweden. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och
skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--10--SE.
- 11 Djurberg, H. Den skogliga informationens roll i ett kundanpassat virkesflöde. - En
bakgrundsstudie samt simulering av inventeringsmetoders inverkan på noggrannhet i
leveransprognoser till sågverk. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och
skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--11--SE.
- 12 Bredberg, J. Skattning av ålder och andra beståndsvariabler - en fallstudie baserad på
MoDo:s indelningsrutiner. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och
skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--12--SE.

- 13 Gunnarsson, F. On the potential of Kriging for forest management planning. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--13--SE.
- 14 Holm, S. & Thuresson, T. samt jägm.studenter kurs 92/96. En analys av skogstillståndet samt några alternativa avverkningsberäkningar för en del av Östads säteri. ISRN SLU-SRG-AR--14--SE.
- 15 van Kerkvoorde, M. A sequential approach in mathematical programming to include spatial aspects of biodiversity in long range forest management planning. ISRN SLU-SRG-AR--15--SE.
- 16 Tormalm, K. Implementering av FSC-certifiering av mindre enskilda markägares skogsbruk. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--16--SE.
- 1997 17 Engberg, M. Naturvärden i skog lämnad vid slutavverkning. - En inventering av upp till 35 år gamla föryngringsytor på Sundsvalls arbetsomsåde, SCA. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN-SRG-AR--17--SE.
- 18 Christoffersson, P & Jonsson, P. Avdelningsfri inventering - tillvägagångssätt och tidsåtgång. ISRN SLU-SRG-AR--18--SE.
- 19 Ståhl, G., Ringvall, A. & Lämås, T. Guided transect sampling - An outline of the principle. ISRN SLU-SRG-AR--19--SE.
- 20 Cedervind, J. GPS under krontak i skog. Examensarbete i ämnet skogsuppskattning och skogsindelning. ISRN SLU-SRG-AR--20--SE.
- 21 Holm, S. & Thuresson, T. samt jägm.studenter kurs 93/97. En analys av skogstillståndet samt några alternativa avverkningsberäkningar för en stor del av Östads säteri. ISRN SLU-SRG-AR--21--SE.
- 22 Ali, Abdul Aziz. Describing Tree Size Diversity. ISRN SLU-SRG-AR--22--SE.
23. Lundström, A., Nilsson, P. & Ståhl, G. Certifieringens konsekvenser för möjliga uttag av industri- och energived. - En pilotstudie. ISRN SLU-SRG-AR--23--SE.
24. Fridman, J. & Walheim, M. Död ved i Sverige. - Statistik från Riksskogstaxeringen. ISRN SLU-SRG-AR--24--SE.
- 25 Lämås, T. & Ståhl, G. Skattning av tillstånd och förändringar genom inventerings simulering - En handledning till programpaketet "NVSIM". ISRN SLU-SRG-AR--25--SE
- 26 Lämås, T. & Ståhl, G. Om dektektering av förändringar av populationer i begränsade områden. ISRN SLU-SRG-AR--26--SE

- 27 Karlsson, A. En studie av tre inventeringsmetoder i slutavverkningsbestånd.
ISRN SLU-SRG-AR--27--SE.
28. Hagner, O. Satellitfjärranalys för skogsföretag. ISRN SLU-SRG-AR--28--SE.
29. Hagner, O. Textur i flygbilder för skattning av beståndsegenskaper.
ISRN SLU-SRG-AR--29--SE.